

KHuK-Empfehlungen zur bevorstehenden ErUM-Pro-Ausschreibung "Teilchen" 2027-2030

Komitee für Hadronen- und Kernphysik (KHuK)

9. Februar 2026



Die Forschung in der Hadronen- und Kernphysik hat maßgeblich zu unserem Verständnis der Struktur der Materie und der Entwicklung des Universums beigetragen. Dennoch bleiben zentrale Fragen offen:

- ↪ Welche dynamischen Mechanismen in der QCD führen zum Farbeinschluss der Quarks und Gluonen?
- ↪ Wie entstehen die komplexen Strukturen von Hadronen und Kernen?
- ↪ Wie verhält sich Kernmaterie unter extremen Bedingungen?
- ↪ Wie entstehen die schweren Elemente im Universum und wo liegen die Grenzen der Stabilität?
- ↪ Wie lassen sich fundamentale Symmetrien (präzise) testen? Gibt es Physik jenseits des Standardmodells?

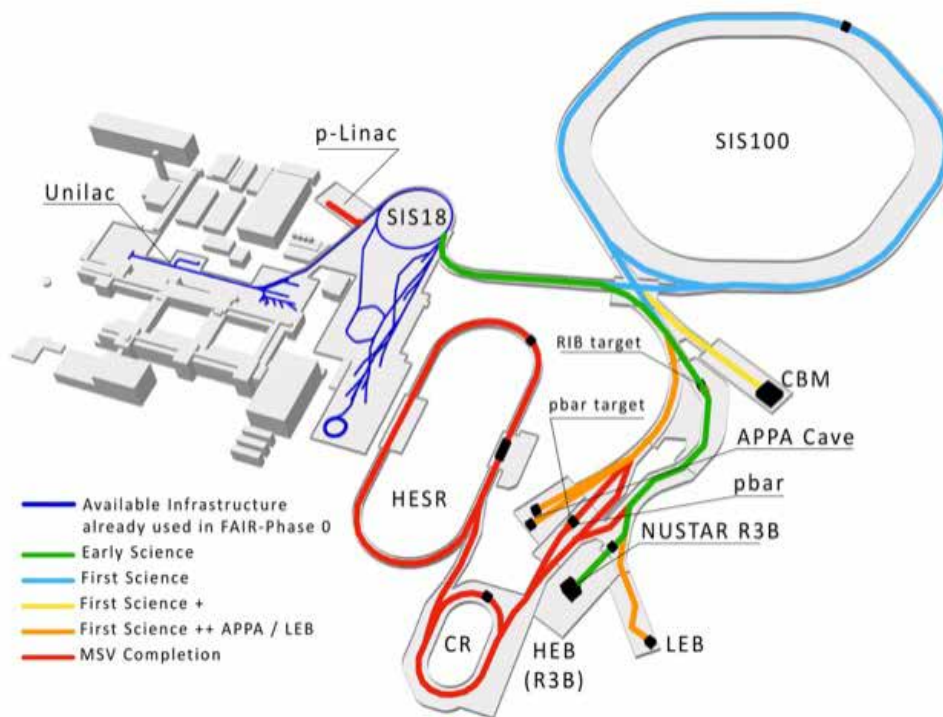
Die Beantwortung dieser grundlegenden Fragen – und damit ein vertieftes Verständnis der Entstehung des Universums sowie der Eigenschaften der Materie auf der Erde und in stellaren Umgebungen – erfordert eine breit aufgestellte und eng verzahnte Herangehensweise von Experiment und Theorie. Die Weiterentwicklung existierender Großgeräte und der Einsatz einer neuen Generation von Beschleuniger- und Experimentieranlagen sind dabei von zentraler Bedeutung. Der theoretischen Atom-, Kern- und Hadronenphysik kommt die wichtige Aufgabe zu, die zentralen Fragestellungen des Feldes zu identifizieren sowie die Experimente zu begleiten und ihre Ergebnisse zu interpretieren. Eine entscheidende Voraussetzung für exzellente Forschung sind hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, deren Ausbildung und berufliche Perspektive verlässlich gewährleistet sein muss.

Das vorliegende Dokument fasst die KHuK-Empfehlungen für die anstehende ErUM-Pro-Ausschreibung *Teilchen* 2027-2030 zusammen. Die Empfehlungen stehen im Einklang mit den jeweils aktuellen Realisierungsplänen der Großgeräte an GSI/FAIR und CERN und mit dem NuPECC Long Range Plan 2024 for Nuclear Physics.

Allgemeine Empfehlungen

- ↪ Zügiger Start des Physikprogramms an FAIR (2027/2028)
- ↪ Umsetzung der ausstehenden Investitionen (APPA, CBM, NUSTAR und PANDA) auf dem Weg zum vollen Ausbau von FAIR.
- ↪ Volle Ausschöpfung des wissenschaftlichen Potenzials und Weiterentwicklung der Experimente am CERN (ALICE am LHC, AMBER am SPS, ISOLDE am PSB).
- ↪ Ausreichende Ressourcen für Physik-Analysen bereitstellen zur angemessenen Beteiligung deutscher Gruppen, insbesondere des wissenschaftlichen Nachwuchses, an der Gewinnung hochrangiger wissenschaftlicher Ergebnisse am CERN und bei GSI/FAIR.

Die folgende Liste und die Grafik veranschaulichen die verschiedenen Phasen der Inbetriebnahme/Fertigstellung der FAIR-Anlage:



Abkürzungsverzeichnis



FAIR Phase-0

Early Science (ES)

First Science (FS)

First Science+ (FS+)

First Science++ (FS++)

Modularized Start Version (MSV)

Forschungsprogramm bei GSI (teils auch an anderen Anlagen) mit verbesserten Strahlen und FAIR-Detektoren.

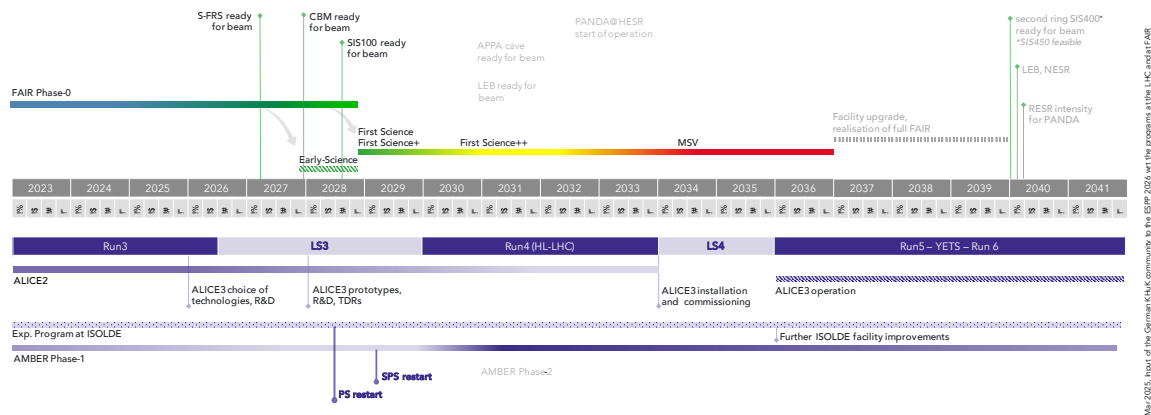
SIS18 zu Super-Fragmentseparator (S-FRS) im High-Energy Branch (HEB)

SIS100 zu S-FRS im HEB

SIS100 zu S-FRS im HEB und zu CBM

SIS100 zu S-FRS im Low-Energy Branch (LEB) und SIS100 zu APPA

Collector Ring (CR), High Energy Storage Ring (HESR) und proton-LINAC (p-LINAC)



Vorläufiger Zeitplan für die Realisierung der FAIR-Anlage und der zugehörigen Experimente sowie des KHuK-relevanten wissenschaftlichen Programms am CERN. Die in Betrieb befindlichen Anlagen werden während der Phasen des FAIR-Projekts weiterhin für Experimente genutzt. Schritte, die über First Science hinausgehen, erfordern zusätzliche Finanzmittel und einen Beschluss des FAIR-Councils.

1 Kernstruktur, nukleare Astrophysik

Das Ziel der Kernstrukturphysik ist das Verständnis des Aufbaus der Atomkerne und der Grenzen ihrer Existenz. Diese Fragestellungen sind eng mit der nuklearen Astrophysik verknüpft, die sich unter anderem mit den Prozessen befasst, durch die Elemente jenseits von Wasserstoff und Helium erzeugt wurden. Auch der Aufbau von Neutronensternen ist eng mit kernphysikalischen Fragestellungen verflochten. Die experimentellen Arbeiten in diesem Gebiet konzentrieren sich auf Experimente mit radioaktiven Strahlen bei GSI/FAIR und ISOLDE/CERN. Dazu werden eine Vielzahl komplementärer Detektionstechniken und experimenteller Aufbauten entwickelt und eingesetzt, an denen die in der Verbundforschung kooperierenden deutschen Gruppen maßgeblich und international sichtbar beteiligt sind. Ziel der Experimente ist ein fundierteres Verständnis der starken Kernkraft und der Entstehung der Elemente. Die **experimentbegleitende Theorie** ist für das Erreichen dieser Ziele und zur konzeptionellen Weiterentwicklung des experimentellen Programms unverzichtbar.

Für die kommenden Förderperiode stehen die Fertigstellung, Inbetriebnahme und die wissenschaftliche Nutzung der neuen Detektorsysteme im Vordergrund. Dazu zählen insbesondere deren Umzug und Aufbau für die **ersten NUSTAR-Experimente an FAIR** sowie die Durchführung und Auswertung dieser Experimente. Ergänzend werden weiterhin Aktivitäten zur Erforschung superschwerer Elemente bei **SHIP und TASCA am UNILAC** verfolgt. Die beteiligten deutschen Gruppen sind im ErUM-Forschungsschwerpunkt T07 — "Aufbau von NUSTAR bei FAIR" zusammengeschlossen. Mit dem schrittweisen FAIR-Start setzt die NUSTAR-Kollaboration (R3B, HISPEC/DESPEC und Super-FRS EC) die für FAIR entwickelten und bereits fertiggestellten Detektoren für einzigartige Experimente im High-Energy Branch (HEB) der FAIR-Anlage ein (ES und FS). Das DESPEC-Experiment wird zunächst zur Validierung der Intensitäten der vom Super-FRS zur Verfügung gestellten radioaktiven Ionenstrahlen dienen und anschließend erste Kernstrukturforschungen an FAIR ermöglichen. Das R3B-Experiment wird einzigartige Untersuchungen mit radioaktiven Strahlen durchführen, die aufgrund der hohen Strahlenergien ausschließlich an der FAIR-Anlage möglich sind. Darüber hinaus treibt die HISPEC/DESPEC-Kollaboration die zügige Vervollständigung des europäischen **AGATA**-Spektrometers aus europäischen Mitteln mit deutscher Beteiligung im Rahmen eines Memorandum of Understanding voran, damit dieses ab ca. 2031 bei FAIR eingesetzt werden kann. Die Super-FRS-EC-Kollaboration wird unter anderem die kryogene Stopzelle am Super-FRS für erste Experimente einsetzen. MATS und LASPEC werden ihr FAIR-Phase-0-Programm bis zur Fertigstellung des LEB fortsetzen und bereits initiierte Projekte zur vorzeitigen Nutzung der in der kryogenen Stopzelle am Super-FRS gestoppten Ionen vorantreiben. Nach der Verlagerung von Experimenten vom FRS zum Super-FRS, wird der FRS an der GSI als Separator für die Injektion sekundärer Strahlen in den **ESR** und

CRYRING@ESR in Betrieb bleiben. Dadurch erweitern sich die einzigartigen Nutzungsmöglichkeiten bei der Speicherringe für kern- und atomphysikalisch motivierte Experimente mit radioaktiven Isotopen. Das wissenschaftliche Programm an ESR und CRYRING soll zudem in Richtung Astrophysik weiterentwickelt werden.

Neben NUSTAR an FAIR ist die ISOLDE-Anlage am CERN ein wichtiger zweiter Schwerpunkt der deutschen Kernstruktur-Aktivitäten. Hier werden Ionenstrahlen radioaktiver Isotope mit niedrigeren Energien mit entsprechend methodisch angepassten Detektoren an **ISOLDE** genutzt und liefern zu den GSI/FAIR-Experimenten komplementäre Informationen zum Verständnis von Kernreaktionen und der Kernstruktur. Präzise Grundzustandseigenschaften werden mittels Massen- und Laserspektroskopie unter deutscher Leitung an **ISOLTRAP** und **COLLAPS** gemessen. Mit der Fertigstellung des **PUMA**-Projektes werden zu Beginn der FP 2027-2030 auch gespeicherte kalte Antiprotonen für die Untersuchung der an ISOLDE erzeugten kurzlebigen Kerne zur Verfügung stehen. Neben Massen, Kernradien und Momenten wird damit auch die Nukleonenverteilung an der Kernoberfläche zugänglich.

Mit dem Ausbau zu **HIE-SOLDE** stehen seit 2015 nachbeschleunigte radioaktive Strahlen mit Energien von bis zu 10 MeV/u zur Verfügung. Im LS3 werden weitere Komponenten des Beschleunigers ertüchtigt und damit auch die Zuverlässigkeit des Betriebs für die kommende FP sichergestellt, so dass insbesondere das mit starker deutscher Beteiligung betriebene **MINIBALL-Spektrometer** und die Zusatzdetektoren wie **C-REX/ T-REX**, wissenschaftlich voll genutzt werden können.

ISOLDE wird kurz nach Beginn der FP 2027-2030 – voraussichtlich im April 2028 – den Betrieb nach dem dritten langen Shutdown des CERN (LS3) wieder aufnehmen („PS restart“ in Fig. 1). Während des LS3 werden zahlreiche Verbesserungen der experimentellen Infrastruktur (u.a. aus Verbundforschungsmitteln) umgesetzt. Dies, gemeinsam mit der zukünftig gesteigerten Intensität und Energie des Protonenstrahls, wird die Attraktivität von ISOLDE weiter steigern und ihre Rolle als weltweit führende ISOL-Anlage festigen.

Zusätzlich sind die ISOLDE-Aktivitäten für die am **FAIR Low-Energy Branch (LEB)** engagierten Arbeitsgruppen, eine unverzichtbare Option zur Weiterentwicklung der für FAIR relevanten Techniken, dem Gewinnen von Daten für laufende Doktorarbeiten und zum Erwerb der für die Durchführung und Analyse von Experimenten benötigten Expertise. Die hohe Sichtbarkeit der deutschen Arbeitsgruppen macht diese für Nachwuchswissenschaftler*innen sehr attraktiv, die dadurch gleichzeitig eine Anbindung an FAIR erhalten und damit dort langfristig mit ihrer Expertise zur Verfügung stehen werden.

Das experimentelle Programm zur Kernstruktur und nuklearen Astrophysik an FAIR und ISOLDE wird durch die **Theorie** direkt unterstützt, um so eine umfassende Interpretation der erhaltenen Ergebnisse zu ermöglichen. Umgekehrt bilden die experimentellen Erkenntnisse die Grundlage für die Weiterentwicklung der Theorie und führen somit zu genaueren Extrapolationen und Vorhersagen in Gebieten der Nuklidkarte, die direkten Experimenten noch nicht zugänglich sind.

Die Förderung in der Periode 2027-30 soll sich auf folgende Punkte konzentrieren:

- Unterstützung der Experimentvorbereitung, -durchführung und Datenanalyse erster NUSTAR-Experimente (R3B, HISPEC/DESPEC und Super-FRS EC) an FAIR sowie der NUSTAR-Experimente am UNILAC
- R&D für die Weiterentwicklung der für FAIR vorgesehenen Detektoren sowie für die baldige Realisation der Experimente am Niederenergiebereich (LEB) des Super-FRS ggf. mit vorläufigen und reduzierten Aufbauten.
- Instrumenten- und Detektor-R&D für einzigartige Experimente, u.a. zur Astrophysik, an den Schwerionen-Speicherringanlagen ESR und CRYRING@ESR der GSI, auch im Hinblick auf die zukünftige Forschung an CR und HESR.
- Weiterführung des erfolgreichen wissenschaftlichen Programms an ISOLDE (COLLAPS, IDS, ISOLTRAP, MINIBALL, PUMA).

2 Schwerionenphysik

Ziel ist die Erforschung von Kernmaterie unter extremen Bedingungen von Temperatur und Dichte, wie sie im Universum Mikrosekunden nach dem Urknall, sowie im Innern von Neutronensternen, insbesondere

bei deren Verschmelzung, vorherrschen. Das ALICE-Experiment sowie das geplante Experiment ALICE 3 am CERN-LHC konzentrieren sich auf die Erforschung von QCD-Materie bei extrem hohen Energiedichten - das Quark-Gluon-Plasma. Die Untersuchung baryonenreicher Kernmaterie unter hohem Druck steht bei den Experimenten HADES und CBM am SIS18/SIS100 bei GSI/FAIR im Mittelpunkt. Insbesondere werden hier Hinweise auf einen Phasenübergang erster Ordnung, von der Hadronenphase hin zu einer neuartigen Form der QCD-Materie, sowie nach dem damit verbundenen kritischen Punkt der QCD gesucht. Das Experimentprogramm profitiert stark durch Theorie in Form von Modellrechnungen auf Basis von QCD-Phänomenologie. Diese stellen den Bezug zur fundamentalen Theorie wie Gitter-QCD, effektiver Feldtheorie und funktionalen Methoden her. Die Förderung der experimentbegleitenden Theorie-Aktivitäten in beiden Bereichen (ALICE und CBM) wird daher empfohlen.

In der Förderperiode 2027-2030 wird der Schwerpunkt der Aktivitäten in der Schwerionenphysik auf (i) dem Betrieb und der Datenanalyse der laufenden Experimente ALICE und HADES, (ii) dem Aufbau und Inbetriebnahme des CBM-Detektors an FAIR, sowie auf (iii) intensiver F&E zur Umsetzung des ALICE-3-Detektordesigns und Bau der erforderlichen Komponenten liegen.

In **ALICE** sind die deutschen Gruppen für die Spurendriftkammer TPC, den Übergangsstrahlungsdetektor TRD sowie das Online-Computingsystem EPN zuständig. Die in den vergangenen Förderperioden unter substantieller deutscher Beteiligung auf- bzw. umgebauten Detektoren haben 2022 ihr Physikprogramm mit p-p und Pb-Pb Kollisionen erfolgreich aufgenommen. Die Datenaufnahme des Run 3 findet bis Ende Juni 2026 statt, der Long Shutdown 3 (LS3) wird bis 2029 dauern. Um das durch das Upgrade geschaffene wissenschaftliche Potenzial voll ausschöpfen zu können erfordert die Fortschreibung des gegenwärtigen Personalbestands. Für die Förderperiode 2027-2030 werden der Mittel dringend benötigt für:

- Wartung der TPC und Ausbau der TRD-Module sowie die Wiederinbetriebnahme der TPC für die Datenaufnahme in Run 4 ab 2030. Parallel dazu erfolgt die abschließende Kalibrierung und Rekonstruktion der Daten aus Run 3. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der TPC-Kalibrierung und der zugehörigen Qualitätssicherungssoftware ist dabei wichtig um die angestrebte intrinsische Detektorauflösung zu erreichen. Der TRD hat mit Ende von Run 3 seine Mission erfüllt und die Förderperiode 2027-2030 beinhaltet die noch nötige Optimierung der Kalibrierung und Simulation des TRD sowie die Aktivitäten zur Dekommissionierung.
- Weiterentwicklung und ggf. Ausbau der innovativen GPU-basierten EPN Computing Farm zur synchronen und asynchronen Ereignisrekonstruktion.
- Die Gewährleistung der Verfügbarkeit von Betriebsmitteln für das ALICE-Experiment, wie in den MoUs vereinbart.

Das **HADES**-Experiment wird während der Inbetriebnahme von FAIR an seinem derzeitigen Standort bei SIS18 verbleiben, um sein Physikprogramm fortzusetzen und das Potenzial des Pionenstrahls voll auszuschöpfen. Zunächst sollen die exklusiven Messungen von elektromagnetischen Resonanz-Dalitz-Zerfällen auf die dritte Baryonresonanzregion ausgeweitet werden. Außerdem sind Untersuchungen der Eigenschaften und Ausbreitung von Vektormesonen und seltsamen Hadronen in Medium unter Verwendung von Kerntargets geplant. Pionenstrahl-Experimente im Bereich von 0,5 bis 2,3 GeV (Impuls des Pionenstrahls) sind ein wesentlicher Bestandteil des Programms zur Untersuchung von QCD-Materie hoher Dichte, das von HADES am SIS18 und dem CBM am FAIR verfolgt wird. Um das einzigartige physikalische Potenzial für die relativistische Schwerionenphysik und Hadronenphysik am SIS18 auszuschöpfen, sprechen wir folgende Empfehlungen aus:

- Betrieb von LGAD, MDC, RICH, ECal und Datenerfassung in den kommenden Strahlzeiten sowie Arbeiten zur Kalibrierung und Rekonstruktion der Daten. Dies erfordert die Beibehaltung des derzeitigen Personalbestands, um das wissenschaftliche Potenzial von HADES und des GSI-Pionenstrahls voll auszuschöpfen.
- Unterstützung der Experimentvorbereitung, -durchführung und der Datenanalyse von Experimenten mit schweren Ionen sowie mit proton- und pion-induzierten Reaktionen.
- Gewährleistung der Verfügbarkeit von Ressourcen für das HADES-Experiment gemäß den Vereinbarungen in den MoUs.

Die FAIR-Projektplanung sieht vor, das **CBM**-Experiment im Jahr Q4/2028 fertig zu stellen. Der Zugang zum CBM-Gebäude ist seit März 2025 möglich, der Kran ist installiert und in Betrieb genommen. Die Installation der CBM-Versorgungseinrichtungen ist parallel zur technischen Gebäudeinfrastruktur 2026–Q1/2027 geplant. Die Installation des Detektors kann 2026 mit der Montage der mechanischen Teile beginnen und mit der Installation der Detektormodule fortgesetzt werden. Die Installation und Inbetriebnahme der Detektoren und des gesamten CBM-Experiments wird mit der Realisierung der für 2026-Q1/2027 geplanten technischen Gebäudeinfrastruktur möglich sein. Die Neuanschaffung des CBM-Magneten ist abgeschlossen. Dies ermöglicht diese zeitkritische Komponente rechtzeitig bis Ende 2026 im CBM-Cave zu installieren und damit eine weitere Fertigstellung des CBM-Experimentes nicht zu verzögern. Eine Entscheidung zur Realisierung von FS+ wird im April 2026 erwartet. Eine auskömmliche Finanzierung der beteiligten Universitätsgruppen in der Förderperiode 2027–2030 ist daher essentiell für die erfolgreiche Realisierung des CBM-Projekts. Deutsche Universitätsgruppen haben eine führende Rolle in der Konstruktion und dem Betrieb von wesentlichen Detektorsystemen von CBM (BMON/BAS, MVD, STS, RICH, TRD, TOF) sowie Online-Processing-System für die Event-Selektion im CBM-Experiment. Für CBM wird die nächste BMFTR-Förderperiode von besonderer Bedeutung sein. Es besteht daher dringender Unterstützungsbedarf für:

- Bau und Inbetriebnahme des CBM-Detektors bei FAIR im Umfang der Startversion und Herstellung der Betriebsbereitschaft im Jahr 2028. Dies erfordert die Bereitstellung ausreichender Mittel, um die im Rahmen des Construction-MoU vereinbarten Bau der CBM-Detektoren zu realisieren. Das MoU zu Maintenance and Operation wurde bereits ausgearbeitet und tritt während der Inbetriebnahmephase der CBM-Detektoren in Kraft.
- Zur Realisierung der CBM-MSV-Version des Detektors sollten die bereits im C.B.M.-Rahmenpapier FP 2024–2027 dargelegten und detaillierten Mittel bereitgestellt werden, unter Berücksichtigung unvorhergesehener Preissteigerungen sowie entsprechende Mittel für Personal.
- In dieser wichtigen Phase des Baus, der Installation, der Inbetriebnahme und der Kalibrierung des CBM-Detektors sowie der Analyse der ersten Daten ist ausreichend Personal unerlässlich.

Das wissenschaftliche Potenzial des LHC-Schwerionenprogramms wird nach dem Ende von Run 4 (2033) nicht erschöpft sein. Daher sollen mit einem Schwerionenexperiment der nächsten Generation - dem **ALICE 3** Experiment - offene fundamentale Fragen im QCD-Sektor mit erheblich gesteigerter Sensitivität bearbeitet werden. Entsprechende Präzisionsmessungen, insbesondere hinsichtlich Multi-Charm- und Di-elektronenproduktion sowie zur Klärung des Hadronisierungsmechanismus wurden im März 2022 in einem Letter of Intent (CERN-LHCC-2022-009), gemeinsam mit einem geeigneten Detektorkonzept, detailliert dargestellt und vom LHCC positiv bewertet. Das ALICE 3 Detektorkonzept wurde inzwischen weiterentwickelt und im eines Scoping Dokument (CERN-LHCC-2025-002) dargestellt. Die deutschen Gruppen sind führend am Outer Tracker (OT), Forward Conversion Tracker (FCT) und Daten-flow und Online-Processing beteiligt. Eine Beteiligung am RICH-Projekt wird derzeit vorbereitet. Mit einer Fläche von ca. 60 m² Silizium Sensoren (MAPS in 65 nm CMOS-Technologie) ist der OT ein sehr ambitionierter Detektor, dessen Komponenten in enger Zusammenarbeit mit deutschen Firmen produziert werden. Dringend erforderlich ist deshalb die Unterstützung für:

- .

3 Fundamentale Wechselwirkungen

Ein breites Spektrum wissenschaftlicher Aktivitäten deutscher Gruppen im Bereich *Fundamentale Wechselwirkungen* werden in ErUM unter dem Thema *Universum* in der Astroteilchenphysik gefördert. Im Rahmen von KHuK werden Experimente zu Fundamentalen Wechselwirkungen im Bereich der Atom- und Plasmaphysik an FAIR (APPA) sowie am CERN (ISOLTRAP, COLLAPS) durchgeführt. Letztere finden bei niedrigen Energien statt und verwenden hochpräzise atomphysikalische Techniken, um zentrale Parameter des Standardmodells zu messen und dessen Grundlagen zu testen.

APPA studiert die Bausteine und Phänomene atomarer Materie unter extremen Bedingungen. Hierzu zählen insbesondere hohe Dichten und Temperaturen sowie starke elektrische und magnetische Felder wie

sie beispielsweise in Sternen und schweren Planeten vorliegen. Dabei werden vorwiegend schwere hochgeladene Ionen und hochintensive Laserstrahlen eingesetzt. Die beteiligten deutschen Universitätsgruppen der Atomphysik und der Plasmaphysik bilden den ErUM-Forschungsschwerpunkt T05 — “Aufbau von APPA bei FAIR”¹.

In den vergangenen Förderperioden wurde an den FAIR-Experimentiereinrichtungen eine umfangreiche Instrumentierung implementiert, die in der Förderperiode 2027-2030 für wissenschaftliche Experimente genutzt und auch weiterentwickelt werden soll, u.a. im Hinblick auf zukünftige Inbetriebnahme von Experimenten im APPA-Cave. Die FAIR-Experimentiereinrichtungen von **SPARC** (Atom-, Quanten- und Fundamentale Physik) sind die Fallen- und Speicherringanlagen **HITRAP**, **CRYRING@ESR**, **ESR** und **SIS100**. Hierbei kommt der gegenwärtig in Inbetriebnahme befindlichen HITRAP Anlage eine besondere Rolle zu. Eine erste Strahlzeit für externe Nutzer wurde bereits 2025 mit auf 6 keV/q abgebremsten Strahlen nackter Goldionen erfolgreich durchgeführt. Ab Mitte 2027 sollen dann auch in der HITRAP-Falle gefangene und gekühlte Ionen zur Verfügung stehen und Präzisionsexperimente ermöglichen. Ebenso werden R&D Aktivitäten für zukünftige Experimente im APPA-Cave von Bedeutung sein. **HED@FAIR** (Plasmaphysik) wird sich auf die Nutzung der Strahlplätze **Z6 (UNILAC)** und **HHT (SIS18)** sowie des Hochleistungslasers **PHLIX** für Experimente konzentrieren. Die APPA-Aktivitäten umfassen auch experimentbegleitende **Theorie**, beispielsweise zur Quantenelektrodynamik in starken Feldern, die für die Einordnung, Interpretation und Publikation der experimentellen Resultate unverzichtbar ist. Das geplante Experimentierprogramm an den oben genannten Anlagen soll unter Einsatz der bereits vorhandenen FAIR-Instrumentierung ein international hoch sichtbares und zum großen Teil einmaliges Forschungsprogramm erschließen und zudem dabei helfen, die Zeit bis zur Inbetriebnahme des APPA-Caves wie auch des HESRs zu überbrücken.

Dringend erforderlich ist dazu:

- Unterstützung der Experimentvorbereitung, -durchführung und Datenanalyse von SPARC und HED@FAIR Experimenten. Die bereits vom GSI G-PAC akzeptierten Experimente sollen nach gegenwärtiger Planung in 2026 & 2027 durchgeführt werden. Für die darauffolgenden Jahre wird ein neuer G-PAC Aufruf voraussichtlich Ende 2026 erfolgen.
- Die Förderung experimentbegleitender Theorie, die für ein tieferes Verständnis der experimentellen Daten und die Publizierbarkeit der Ergebnisse unverzichtbar ist.
- Förderung neuer Konzepte und Technologien zur Manipulation gespeicherter Ionen (Speicherringe und Fallen), um das Potential der aktuellen FAIR- und ISOLDE-Anlagen bezüglich Präzisionsexperimenten zu erweitern und auch perspektivisch optimal auszunutzen (z.B. Überprüfung des Standardmodells).

4 Hadronische und elektromagnetische Sonden

Das Ziel der Hadronenphysik mit hadronischen und elektromagnetischen Sonden ist die Erforschung der inneren Struktur sowie des Anregungsspektrums von gebundenen Zuständen aus Quarks und Gluonen. Im Rahmen der Verbundforschung wurden in den vergangenen Jahren zwei Großprojekte gefördert, nämlich das AMBER-Experiment am CERN, das seit 2023 Daten nimmt, sowie das PANDA-Experiment, dessen Realisierung jedoch erst in der MSV-Phase von FAIR möglich sein wird. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der „QCDAFAIR“-Initiative ein Physikprogramm entwickelt, welches in den kommenden zehn Jahren und zunächst ohne Antiprotonen das wissenschaftliche Potenzial der bestehenden sowie der im Aufbau befindlichen FAIR- und GSI-Infrastrukturen für die Hadronenphysik ausschöpft. Dieses Forschungsprogramm wurde kürzlich in dem Whitebook “Hadron physics opportunities at FAIR“ zusammengefasst. In Zusammenarbeit der experimentellen Communities sowie interessierter Theoriegruppen sollen hochintensive Hadronenstrahlen an Anlagen wie der CBM-Startversion und dem Super-FRS, sowie ein Pionenstrahl an HADES genutzt und so ein Mehrwert generiert werden.

¹Neben der Atomphysik und der Plasmaphysik operieren auch die Materialwissenschaften (MAT) und die Biophysik (BIO) unter dem Dach von APPA. Die zu MAT gehörigen deutschen Universitätsgruppen werden im Rahmen des ErUM-Programms im Feld “Materie” gefördert. BIO-Aktivitäten wurden bisher nicht im Rahmen von ErUM gefördert.

AMBER (NA66) ist eine Fixed-Target Einrichtung am M2-Strahl des CERN-SPS, das weltweit einzigartige Messungen auf dem Gebiet der nichtperturbativen QCD durchführt. Die dafür erforderlichen hochenergetischen Myonen-, Pion- und Kaonenstrahlen sind ausschließlich am CERN verfügbar. AMBER nimmt seit 2023 Daten, wobei in den ersten beiden Jahren die Messung des Produktionsquerschnitts von Antiprotonen in p -He und p - p/d Kollisionen im Vordergrund stand. Derzeit bereitet AMBER die erste Messung des elektrischen Formfaktors des Protons in der elastischen Streuung hochenergetischer Myonen an Protonen vor, die für 2026 geplant ist. Das Experiment erfordert die Installation einer mit bis zu 20 bar Wasserstoff gefüllten Hochdruck-Zeitprojektionskammer, die als aktives Target dem Nachweis des Rückstoßprotons dient. Das gestreute Myon wird mit Hilfe eines neuen hochpräzisen Vertex- und Tracking-Systems nachgewiesen, das aus monolithischen aktiven Pixelsensoren (MAPS) und Szintillationsfaserdetektoren besteht. Das Datenerfassungssystem (DAQ) wird von einem getriggerten auf ein Free-Streaming-System mit einem Online High-Level-Trigger umgestellt. Alle Detektoren und die neue DAQ wurden 2025 erfolgreich getestet, und die Vorbereitungen für den ersten Teil der physikalischen Datennahme im Jahr 2026 sind in vollem Gange. Um die angestrebte Unsicherheit von unter 0.01 fm zu erreichen, ist unmittelbar nach LS3 eine weitere Datennahme mit dem Myonenstrahl vorgesehen. Das dritte Thema der AMBER Phase-1, die Messung der Quark-PDFs von Pionen und Kaonen über den Drell-Yan-Prozess, wird ebenfalls nach LS3 behandelt werden. Testmessungen zum Nachweis der Teilchenidentifikationsfähigkeiten bei maximaler Strahlintensität wurden bereits durchgeführt. Die Entwicklung von Hardware-Komponenten, die für diese Messung benötigt werden, läuft bereits. Dazu gehören neue großflächige mikrostrukturierte Gasdetektoren sowie ein Silizium Vertex Tracker.

Phase 2 von AMBER, deren Start derzeit für 2031 geplant ist, wird sich auf Messungen mit einem intensiven Kaon-Strahl konzentrieren. Dazu gehören die Spektroskopie von seltsamen Mesonen, Messungen der Gluonenstruktur von Pionen und Kaonen mittels kaoninduzierter Produktion von prompten Photonen, die Bestimmung der Niedrigenergieparameter des Kaons in ultraweichen Kollisionen mit Kernen und Messungen von Mesonenladungsradien in inverser Kinematik. Die für die Messungen notwendige Erhöhung der Strahlintensität und -qualität wird im Rahmen des laufenden North-Area Consolidation Programms (NA-CONS) des CERN mit einem Investitionsvolumen von ca. 170 MCHF sowie weiteren bereits genehmigten Upgrades der M2-Beamline durchgeführt. Die Teilchenidentifizierung sowohl vor als auch hinter dem Target ist ein wesentlicher Bestandteil des Physikprogramms der Phase 2. Das vollständige Physikprogramm von AMBER wird auch die Strahlzeiten nach LS4 der CERN-Beschleuniger umfassen.

Die deutschen AMBER-Gruppen liefern entscheidende Beiträge zu:

- Spurrekonstruktion mit szintillierenden Fasern und
- großflächigen mikrostrukturierten Gasdetektoren,
- Vertexrekonstruktion mit monolithischen aktiven Pixelsensoren,
- Ausbau der freilaufenden DAQ und
- Entwicklung von High-Level-Triggering Algorithmen.

In der Förderperiode 2027-2030 werden Mittel für den Aufbau des GEM- und Pixel-Trackingsystems für das DY-Programm, das notwendige Upgrade der szintillierenden Faserdetektoren, sowie DAQ-Hardware benötigt. Außerdem werden Mittel und Personal für den Betrieb und die Wartung der von den deutschen Gruppen beigesteuerten Detektoren beantragt. Zu mehreren der verfolgten physikalischen Fragestellungen werden die Grundlagen von deutschen Theorie-Gruppen beigetragen, und die Auswertung und Interpretation der Daten ist in Zusammenarbeit mit diesen Gruppen vorgesehen. Der Umfang der beantragten Mittel entspricht in etwa dem der bisherigen AMBER-Anträge.

Das **PANDA**-Experiment bietet einzigartige Möglichkeiten zum fundamentalen Studium der QCD, wie zuletzt der Review aus 2022 bestätigt hat. Diese Voraussetzungen können von keinem anderen Experiment weltweit gewährleistet werden.

Aufgrund der verzögerten Realisierung der nötigen Einrichtungen an FAIR, insbesondere des Antiprotonentargets, der Beamlines und der Speicherringe, die in der MSV von FAIR völlig neue Experimente erlauben werden, gibt es keine aktuell festzulegende Timeline hinsichtlich der Schaffung der experimentellen Voraussetzungen für intensive Antiprotonenstrahlen. Gleichzeitig sind viele der Komponenten für

PANDA von der Software für Simulation und Analyse über die Datenerfassung und Slow Control bis zu Detektoren und Detektorkomponenten, in wesentlichen Teilen zur Einsatzreife gebracht worden. Inbetriebnahme, Qualitätskontrolle und Einsatz in Experimenten sind daher in direkter Absprache mit den internationalen Förderinstrumenten und FAIR Gegenstand der aktuellen Zielsetzung der Kollaboration. Zu diesem Zweck wurde ein Netzwerk geschaffen, das die PANDA-relevanten Aspekte der Experimente, die PANDA-Komponenten nutzen oder anderweitig auf PANDA-Entwicklungen zugreifen, zusammenführt und weiter auf Eignung für die immer aktuelleren Fragestellungen in der Hadronenspektroskopie im Charmonium-Massenbereich, die PANDA zu adressieren beabsichtigt, abprüft. Dazu gehört auch die Einbindung neuester Entwicklungen im Technologiesektor, an denen PANDA weiter federführend beteiligt sein wird.

Die BMFTR-finanzierten deutschen Arbeiten bei PANDA konzentrieren sich auf die Nutzung und Weiterentwicklung der Targets, der elektromagnetischen Kalorimeter, des Tracking geladener Teilchen mit Straw Tubes und Si-Detektoren, der Entwicklung von Cherenkov-Detektoren (forward disc DIRC, barrel DIRC) sowie federführende Beiträge zur Datenerfassung, der Experimentkontrolle, den Simulationen und der Analysesoftware. All diese Komponenten werden an den Knoten des PANDA-Netzwerks in Kooperation von PANDA-Gruppen mit anderen internationalen Partnern zum Einsatz kommen, dabei wesentliche Erkenntnisse zur Performance und andere für den späteren gemeinsamen Betrieb an PANDA relevante Daten liefern und dem wissenschaftlichen Nachwuchs Gelegenheit geben, alle Komponenten im Einsatz zu nutzen und Physikanalysen voranzutreiben.

In der kommenden Förderperiode sind keine Anträge für die Nutzung oder den Weiterbau von Komponenten geplant, deren Commissioning Gegenstand der aktuellen Förderperiode ist, sofern sie nicht für den Einsatz an FAIR z.B. bei KOALA vorgesehen sind. Solche Anträge werden von den jeweiligen Nutzern gestellt und verantwortet werden.

Aktuell umfasst eine erste Liste der deutschen Netzwerkknoten:

- Am Elektronenbeschleuniger ELSA wird in den kommenden Jahren ein neues Experiment, **INSIGHT**, aufgebaut. INSIGHT wird das sehr erfolgreiche Baryonenspektroskopie-Programm an ELSA entscheidend erweitern und insbesondere die präzise Untersuchung von Λ^* - und Σ^* -Hyperonen ermöglichen. Die Vorwärts-Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters von PANDA, die in der Vergangenheit aus Mitteln der Verbundforschung aufgebaut wurde, wird als zentraler Teil des INSIGHT-Experimentes die präzise Messung von Photonen in Vorwärtsrichtung ermöglichen.
- Die **rückwärtige Endkappe** des elektromagnetischen Kalorimeters (BWEC) des PANDA-Experimentes wurde in Mainz fertig gestellt. Sie wurde bei einem Experiment zur Messung des Pion-Übergangsformfaktors in Primakoff-Kinematik am Elektronenstrahl des MAMI-Beschleunigers während etwa 800 Stunde Strahlzeit eingesetzt. Die Daten werden zurzeit analysiert, und weitere Messungen mit der rückwärtigen Endkappe werden ausgearbeitet. Auch das BWEC-Kalorimeter wurde in der Vergangenheit aus Mitteln der Verbundforschung finanziert.
- Im **KOALA**-Experiment, das ab 2027 in Cave C der GSI als FAIR-Phase-0-Initiative betrieben wird, können erstmals mehrere für PANDA entwickelte Komponenten gemeinsam zum Einsatz kommen. In der ersten Phase von KOALA gehören dazu der auf HV-MAPS basierende Luminositätsdetektor, das PANDA-Clusterjet-Target sowie ein spezieller Recoil-Detektor, der in die Streukammer integriert wird. Auch diese Komponenten wurden über mehrere Förderperioden hinweg aus Mitteln der Verbundforschung aufgebaut. Das primäre physikalische Ziel von KOALA ist die Messung des differentiellen Wirkungsquerschnitts der elastischen Proton-Proton-Streuung im Interferenzbereich zwischen Coulomb- und nuklearer Amplitude – in einem kinematischen Bereich, der bislang unerforscht ist. Erweiterungen des physikalischen Messprogramms, evtl. durch Einsatz weiterer Detektorkomponenten, werden zurzeit vorbereitet.
- Dazu kommen bereits eingeleitete oder aktuell in Diskussion befindliche Zusammenarbeiten mit dem Einsatz von Teilen des elektromagnetischen Kalorimeters bei der beschleunigergestützten Suche nach Dunkler Materie (DarkMESA in Mainz, BDX am Jefferson Laboratory) und weitere mögliche Zusammenarbeiten auch mit anderen Experimenten an GSI und FAIR.

5 Querschnittsthemen

5.1 F&E-Detektoren

Die Entwicklung neuer Detektortechnologien für Experimente an Großforschungsanlagen ist entscheidend für die optimale Nutzung existierender und zukünftiger Infrastrukturen und damit für den langfristigen Fortschritt auf dem Gebiet der kleinsten Teilchen. Dies erfordert Ressourcen, die über den Aufbau und den Betrieb von Detektoren in laufenden Experimenten hinausgehen. Gemeinsam mit KET und KAT werden über einzelne Experimentkollaborationen hinausgehende strategische Entwicklungen identifiziert und entsprechende Verbünde etabliert. Die europäische Teilchenphysik organisiert ihre strategischen Detektorentwicklungen im Rahmen der ECFA Detector R&D Roadmap² in Detector Research & Development (DRD) Kollaborationen, die am CERN angesiedelt sind. Für die Kern- und Hadronenphysik wurden prioritäre Projekte im NuPECC Long Range Plan 2024³ identifiziert. Dabei gibt es bei einigen Technologien großen Überlapp zwischen den Communities, einige werden stärker in dem einen oder anderen Feld verankert sein. Für neue Verbünde im Rahmen des Querschnittsthemas Detektoren von ErUM-Pro sollte es keine Rolle spielen, ob die Mitglieder der Verbünde in DRDs organisiert sind oder nicht. Viele laufende und geplante F&E-Projekte aus dem KHuK-Umfeld haben einen direkten Bezug zur Hightech-Agenda des BMFTR.⁴ Gegenwärtig sind Verbünde zu folgenden wichtigen F&E-Entwicklungen aus dem Bereich KHuK geplant:

- Halbleiter-Detektoren: **CMOS Monolithic Active Pixel Sensoren (MAPS)** stellen die Schlüsseltechnologie zur Erfüllung der hohen Anforderungen moderner Schwerionenexperimente an Orts- und Zeitauflösung sowie an die Ratenfestigkeit von Spur- und Vertexdetektoren dar. Die bahnbrechende, auf hochintegrierten ASICs basierende Technologie wurde zunächst im Kontext von Schwerionenexperimenten wie STAR-HFT und ALICE-ITS2 entwickelt und etabliert und findet inzwischen eine zunehmend breite Anwendung. Zur Erfüllung der Anforderungen einer neuen Detektorgeneration sind insbesondere erhebliche Verbesserungen der Zeitauflösung und der Strahlentoleranz der Sensoren erforderlich, bei gleichzeitiger Beibehaltung ihrer minimalen Leistungsaufnahme und Vakuumtauglichkeit. Ergänzend ist eine hochentwickelte Technologieumgebung notwendig, um das ultraleichte Materialbudget der Sensoren voll auszuschöpfen und die von ihnen erzeugten extremen Datenraten effizient zu beherrschen.

Um einer breiteren Nutzergruppe den Zugang zu MAPS zu ermöglichen und zugleich den effizienten Aufbau großskaliger Detektorsysteme auf dieser Basis zu unterstützen, werden eine gezielte Stärkung der Entwicklerbasis sowie eine Standardisierung der zugrunde liegenden Technologie angestrebt.

Silizium-Sensoren mit höchster Zeitpräzision auf Basis der **LGAD-Technologien** haben ein hohes Anwendungspotenzial in zukünftigen Kernphysikexperimenten. Bereits jetzt werden sie als strahlenharte Startzeitdetektoren im Primärstrahl (Protonen) platziert. Sowohl CMOS- als auch LGAD-Technologien werden im NuPECC LRP 2024 unter „Forthcoming Detector Challenges and New Instrumentation“ als Prioritäten hervorgehoben.

- Gasbasierte Detektoren: **Mikrostrukturierte gasbasierte Detektoren (MPGD)** sind eine Schlüsseltechnologie für die Rekonstruktion geladener Teilchenspuren in Hochraten-Experimenten mit festem Target (AMBER, CBM, HADES, PANDA etc.) sowie in zukünftigen Collider-Experimenten. Die am weitesten verbreiteten Realisierungen sind GEMs und Micromegas; darüber hinaus werden kontinuierlich neue, vielversprechende Strukturen wie z. B. μ RWELL entwickelt. **Multi-gap Resistive Plate Chambers** finden als großflächige, schnelle Detektoren mit moderater Ortsauflösung als Trigger- und Myondetektoren vielfältige Anwendung.

Im Vordergrund der Entwicklungen stehen die weitere Reduktion der Materialbelegung und gleichzeitige Vergrößerung der aktiven Fläche, die Verwendung nachhaltiger Gasmischungen, die Verbesserung der Zeitauflösung, sowie multi-dimensionale Messungen von Ort, Energie, und Zeit. Gleichzeitig spielt das Verständnis der mikroskopischen Prozesse eine zentrale Rolle für Vorhersagen der Eigenschaften von neuen Detektorvarianten mittels Simulationen.

²<https://indico.cern.ch/event/957057/>

³NUPECC LRP 2024 PDF

⁴BMFTR Hightech-Agenda

- **Kalorimetrie:** Der Nachweis von Photonen mit höchster Präzision hinsichtlich Zeit-, Orts- und Energieauflösung und größter Effizienz bedarf spezieller Detektoren. Dabei erstreckt sich das Anforderungsprofil von hochenergetischen Photonen im Bereich vieler GeV bis zur präzisen Messung in Kernübergängen mit wenigen MeV und darunter. Kalorimeter in der Teilchenphysik sind in aller Regel großvolumige, aufwändige Szintillator-basierte Strukturen mit spezialisierter Auslese der Signale, die von elektromagnetischen Schauern im Material ausgehen. Neben der konsequenten Weiterentwicklung der grundsätzlich etablierten Verfahren ist die kontinuierliche Suche nach neuen Materialien und Verfahren eine wesentliche Aufgabe, die es erlaubt, auch für neue Forschungsfelder und damit verbunden veränderte Anforderungsprofile zu geeigneten Lösungen zu kommen.

5.2 F&E-Computing

Computing spielt eine zentrale Rolle beim Betrieb und bei der physikalischen Datenauswertung der Experimente sowie bei den Berechnungen der theoretischen Modelle. Darüber hinaus hat Computing einen starken Anknüpfungspunkt zur Hightech-Agenda des Bundes in der Schlüsseltechnologie Künstliche Intelligenz. Nicht nur der direkte Einsatz von KI sondern auch die Verarbeitung von großen Datenmengen und die innovative Verwendung von optimierter Hardware sind Kernkompetenzen, die für den erfolgreichen Einsatz von KI unerlässlich sind. Zur Gewährleistung der erfolgreichen Inbetriebnahme und des Betriebs der Experimente im Rahmen der geplanten Forschungsvorhaben ist eine gezielte Förderung der folgenden experimentnahen Forschungsmaßnahmen erforderlich. In experimentübergreifenden Vorhaben können Synergieeffekte genutzt werden, um Ressourcen und Experten-Know-How effizienter in der experimentnahen Softwareentwicklung einzusetzen.

- Einsatz von KI: KI-gestützte Algorithmen können in vielen Bereichen zur Verarbeitung der Experimentdaten eingesetzt werden und dabei die Leistung von klassischen Algorithmen übertreffen. Einige Beispiele sind der Einsatz nahe am Detektor zur schnellen online Prozessierung der Rohdaten auf den oben genannten dedizierten Hardwarekomponenten, zur Experimentüberwachung, um fehlerhafte Detektorkomponenten schnell identifizieren zu können, zur Detektorkalibrierung, zur Rekonstruktion der physikalischen Ereignisse, zur Datenanalyse, um Muster der zu untersuchenden Physik in den Daten zu erkennen sowie zur schnellen Simulation der Detektoren.
- Online Event-Selektion: Entwicklung und Optimierung von Algorithmen zur schnellen Datenprozessierung und -selektion, um die großen Datenmengen der Detektoren zielgerichtet verarbeiten und reduzieren zu können. Zur Ausnutzung effizientere Architekturen wie FPGAs oder GPUs werden sowohl Hardwarekomponenten, insbesondere aber Entwicklungspersonal für die Portierung der Algorithmen benötigt.
- Effizienter Zugriff auf große Datenmengen: Moderne Detektorsysteme produzieren mit mehreren Petabyte pro Jahr große Datenmengen. Die Speicherinfrastrukturen werden zu großen Teilen durch die Forschungsinfrastrukturen wie FAIR und GSI, aber auch innerhalb der NFDI, bereitgestellt. Zur effizienten Nutzung durch die Experimente sind Entwicklungsarbeiten notwendig, insbesondere zum Datenmanagement, dem effizienten und nutzerfreundlichen Zugriff auf die großen Datenmengen und die optimale Integration in die Workflows der Experimente.

5.3 F&E-Beschleuniger

Die Verbesserung der Datenqualität aus beschleunigerbasierten Experimenten basiert auch auf Forschung und Entwicklung in der Beschleunigertechnologie sowie auf Methodenverbesserungen im Betrieb von Beschleunigern und Komponenten. FE-Projekte bilden zudem die nächste Generation des wissenschaftlichen Nachwuchses für die Auslegung, den Aufbau und Betrieb von Teilchenbeschleunigern aus. Dies gilt insbesondere auch in Schlüsseltechnologien wie Hoch-Temperatur-Supraleiter (HTS)-Magnete und supraleitende Radiofrequenz (SRF)-Systeme, Kryotechnik, Diagnostik und Messtechnik sowie Steuerungssysteme. F&E-Beschleunigerprojekte sind daher von großem Interesse für KHuK.

- Deutschland führt in der Teilchenbeschleunigung mit supraleitenden Radiofrequenz (SRF)-Systemen. Materialwissenschaftliche Studien und Prototypen zur Optimierung von Oberflächen für höhere Be-

schleunigungsfelder bei reduzierten Leistungsverlusten ermöglichen kompaktere und effizientere Systeme für geplante Upgrades. Für die Hadronenbeschleunigung sind Schlüsseltechnologien wie Ionenquellen, Hochleistungs-RF-Quadrupol-Strukturen, Driftröhren-Resonatoren und SRF-Kavitäten sowie Optimierungsverfahren erforderlich.

- Effiziente HTS-Magnete, Materialstudien zu HTS-Bändern, verlustarme Stromzuführungen und Kryotechnologie sind entscheidend für Beschleuniger sowie Strahlrohre und Detektorsysteme zur Ablenkung und Filterung geladener Teilchen. Die Magnetsysteme zur Manipulation der Teilchentrajektorien müssen kompakt und energieeffizient sein.
- ▪ Nach der erfolgreichen Demonstration des weltweit ersten Multi-Turn SRF-Energie-Recovery-Linearbeschleuniger (ERL) im S-DALINAC/TU Darmstadt sind weitere Betriebserfahrungen erforderlich, um dieses Konzept für zukünftige Beschleuniger weiter zu validieren.
- Die Optimierung und Leistungssteigerung großer Beschleunigeranlagen in Bezug auf Strahlstabilität, -qualität und -kontrolle beginnt mit breitbandigen, empfindlichen Hochdurchsatz-Diagnosesystemen. Ihre Verfügbarkeit und Weiterentwicklung für die Anwendung an FAIR sollte sichergestellt werden.
- Die Anwendung additiver Fertigungstechniken für den 3D-Druck von Komponenten ermöglicht schnellere Reparaturen und Upgrades bestehender Beschleuniger und schafft neue Möglichkeiten für geplante Anlagen, Strahlrohre und Probenumgebungen.
- Weiterreichende F&E-Arbeiten für zukünftige und sehr kompakte Leptonen- und Hadronenanlagen umfassen laserbasierte und strahlbasierte Plasmabeschleunigung.

SRF-Teilchenbeschleuniger sowie Infrastrukturen wie Reinräume, Testplätze und Magnet- sowie Kryomesstischen stehen an Universitäten in Darmstadt (S-DALINAC/ERL), Karlsruhe (COMPASS, MCF/Kyro- und Magnettestplätze) und Mainz (MAMI, MESA) sowie in Helmholtz-Einrichtungen (HELIAC/GSI, DESY) für Tests von Prototypen, Pilotproduktionen (First-of-Series) und innovativen Methoden zur Verfügung.

6 Weitere Empfehlungen

- Bereitstellung der zugesagten Mittel für die anteilige Beschaffung der gemeinsamen Experiment-Infrastrukturen (Common Fund) wie sie in den Construction-MoUs vereinbart sind.
- Eine breite und nachhaltige Verankerung von Wissenschaftskommunikation und Nachwuchsgewinnung ist zentral für die Zukunft der Hadronen- und Kernphysik.

Netzwerk Teilchenwelt (NTW) bildet das Rückgrat der präsenzbasierten, bundesweiten Wissenschaftskommunikation und Nachwuchsgewinnung. Mit seinem gestuften Programm etabliert NTW eine nachhaltige Talentpipeline für die Community der Kern-, Hadronen- und Teilchenphysik insgesamt. Die verlässlichen Strukturen und kontinuierlichen Programme erhöhen dabei nicht nur die Attraktivität für junge Menschen, sondern auch für institutionelle Partner. Darauf aufbauend entfaltet NTW über die unmittelbare Nachwuchsförderung hinaus eine ausgeprägte Hebelwirkung: Durch die koordinierte Zusammenarbeit von 34 Standorten werden Outreach-Aktivitäten in weiteren Programmen verstärkt und substanzielle In-kind-Beiträge aktiviert.

Die Fortführung der Koordination von NTW in der bewährten Verbundstruktur mit vier Partnern (Bonn, Dresden, Mainz, Münster) ist geplant. Aufgrund der in der Förderperiode 2024–2027 deutlich reduzierten Ressourcen ist jedoch eine Aufstockung der Mittel in der Förderperiode 2027–2030 erforderlich, um die Programme zur Nachwuchsgewinnung zu sichern und das Potenzial der etablierten Strukturen auszuschöpfen.

Komplementär zu den breit angelegten, präsenzbasierten Aktivitäten von Netzwerk Teilchenwelt leistet das LHC-ErUM-FSP-Büro eine professionell koordinierte Öffentlichkeitsarbeit gegenüber Politik, Hochschulen und Wirtschaft. Um die Öffentlichkeitsarbeit und Nachwuchsgewinnung der vier FAIR-FSPs (APPA, CBM, NUSTAR und PANDA) zu konsolidieren, stärker in bestehende Strukturen zu integrieren und nachhaltig zu stärken sowie die Akteure an GSI/FAIR besser zu vernetzen und in

gemeinsamen Aktivitäten zusammenzuführen, soll die bei GSI/FAIR geschaffene Schnittstellenposition zu den FSPs (Joint Outreach Office) durch eine Stelle aus der Verbundforschung komplettiert werden.

- Unterstützung des ECT*: Wir empfehlen die kontinuierliche Förderung von ECT* mindestens in Höhe der im bisherigen Memorandum of Understanding vereinbarten Summe. Die Unterstützung für dieses einzigartige europäische Zentrum an der Spitze der Forschung in der theoretischen Kernphysik, welches Theorie und Experiment zusammenbringt, interdisziplinäre Verbindungen herstellt und eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung der nächsten Generation von Wissenschaftlern in einem breiten Spektrum von Forschungsgebieten spielt, muss höchste Priorität haben.
- Das Arbeitstreffen Kernphysik in Schleching existiert seit 1970 und widmet sich jedes Jahr drei hochaktuellen Themen aus den Bereichen der Schwerionen-, Hadronen- und Kernphysik. In Vorlesungen und Spezialvorträgen werden diese Themen einem ausgewählten Kreis von auf Vorschlag erfahrener Wissenschaftler eingeladenen Doktorandinnen und Doktoranden sowie Postdocs präsentiert und intensiv diskutiert. Das Treffen dient einerseits der Stärkung der wissenschaftlichen Community, fördert andererseits aber auch die Entstehung neuer Vernetzungen und Kooperationen. Wir empfehlen ausdrücklich, die langjährige Unterstützung durch die Verbundforschung auch künftig fortzusetzen.